

**Υδραυλικές Κατασκευές – Φράγματα**  
8ο εξάμηνο Σχολής Πολιτικών Μηχανικών

---

**Υδρολογικός σχεδιασμός συστημάτων  
υπερχειλίσης**

---

**Ανδρέας Ευστρατιάδης**

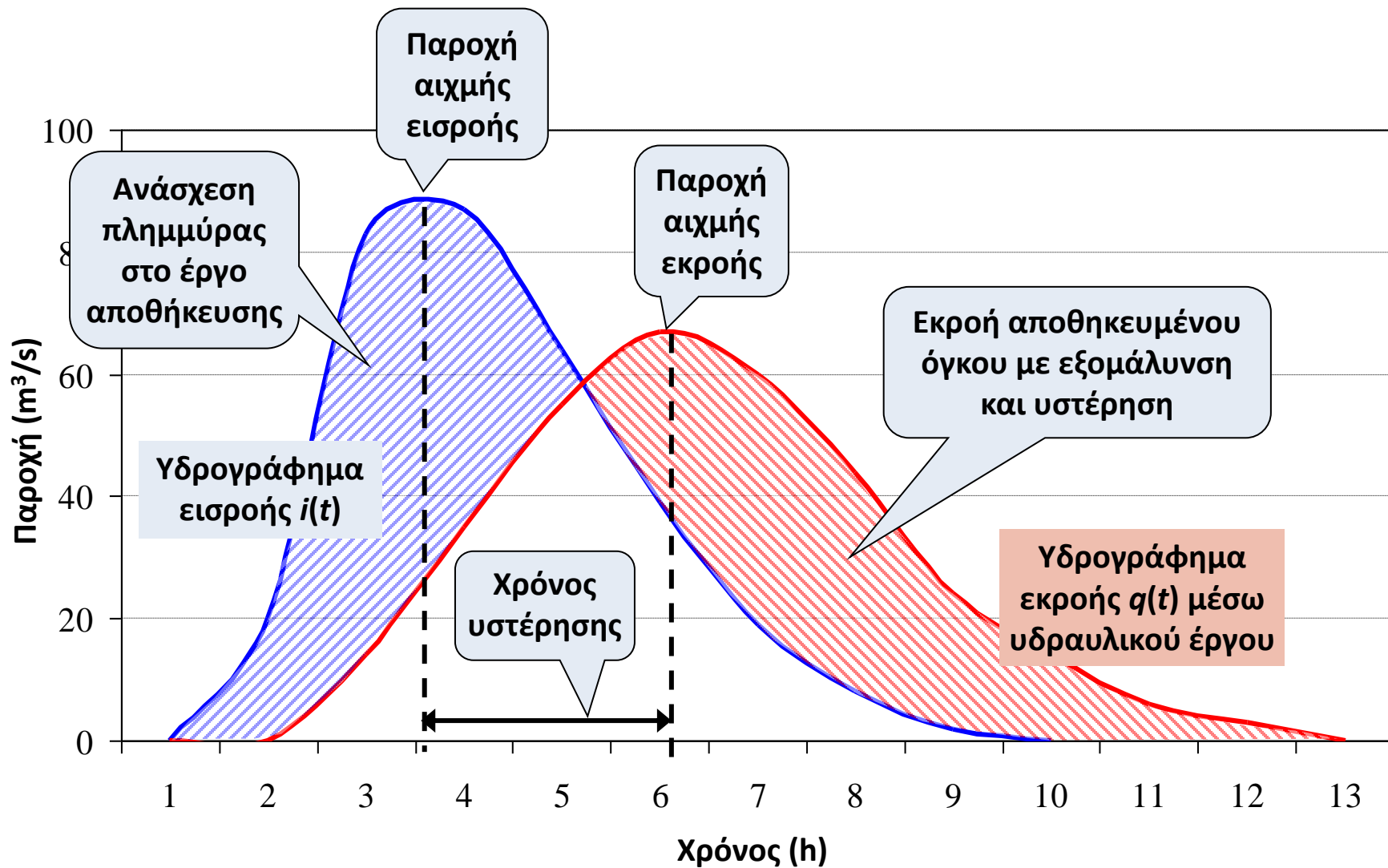
Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Ακαδημαϊκό έτος 2022-23

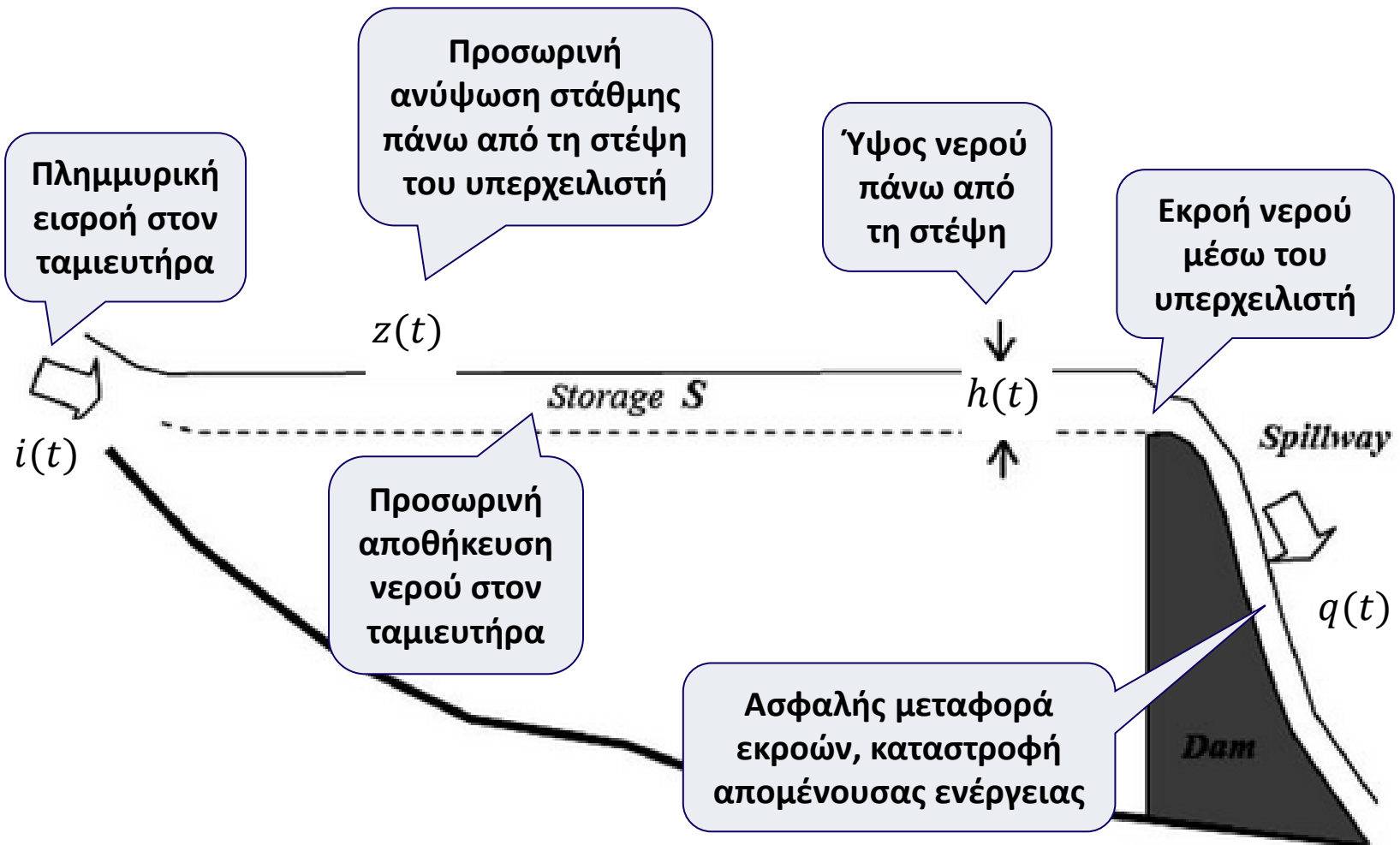
# Υδρολογικός σχεδιασμός έργων ασφαλείας

- Υδρολογικός σχεδιασμός **υπερχειλιστή**:
  - Σκοπός η προστασία του φράγματος κατά τη φάση λειτουργίας του και η ομαλή προσαγωγή των πλημμυρών στο κατάντη υδατόρευμα (σύστημα έργων υπερχειλίσης)
  - Ανάσχεση πλημμύρας στη λεκάνη κατάκλυσης (ταμιευτήρας) ανάντη του φράγματος
  - Συνήθης διάταξη: ροή με ελεύθερη επιφάνεια πάνω από τον υπερχειλιστή (εξαιρέσεις: σήραγγοειδείς και χοανοειδείς υπερχειλιστές)
  - Ζητούμενα μεγέθη:
    - Μέγιστη παροχή εκροής → διαστάσεις υπερχειλιστή και συναφών έργων
    - Ανώτατη στάθμη πλημμύρας φράγματος → ύψος φράγματος
  - Περίοδος επαναφοράς πλημμυρογραφήματος εισόδου: 1 000-10 000 έτη (κατά περίπτωση, ο σχεδιασμός γίνεται με βάση την *πιθανή μέγιστη κατακρήμνιση*, που εκτιμάται ότι αντιστοιχεί σε περίοδο επαναφοράς τάξης μεγέθους 60 000 έτη)
- Υδρολογικός σχεδιασμός **σήραγγας εκτροπής**:
  - Σκοπός η προστασία του φράγματος κατά τη φάση κατασκευής του
  - Ανάσχεση πλημμύρας στη λεκάνη κατάκλυσης ανάντη του προφράγματος
  - Ροή στη σήραγγα αρχικά με ελεύθερη επιφάνεια και στη συνέχεια υπό πίεση
  - Μεγέθη σχεδιασμού: διαστάσεις σήραγγας και προφράγματος → πρόβλημα οικονομοτεχνικής βελτιστοποίησης
  - Περίοδος επαναφοράς πλημμυρογραφήματος εισόδου: 10-50 έτη

# Χρονική εξέλιξη του προβλήματος διόδευσης-ανάσχεσης πλημμυρών μέσω υδραυλικών κατασκευών



# Διόδευση πλημμύρας μέσω υπερχειλιστή



Η εκροή διαμέσου του υπερχειλιστή εξαρτάται από:

- ❑ τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του υπερχειλιστή (κυρίως το πλάτος)
- ❑ το (χρονικά μεταβαλλόμενο) υδραυλικό φορτίο  $H = h + V^2/2g$

# Γενική διατύπωση μοντέλου διόδευσης

## □ Δεδομένα εισόδου:

- Πλημμυρογράφημα **εισροής**,  $I_t$ , σε διακριτά χρονικά βήματα (χρονοσειρά)
- Σχέση **στάθμης-αποθέματος** ταμιευτήρα,  $S = S(z)$
- Σχέση **στάθμης-παροχής** υπερχειλιστή,  $Q = Q(z)$
- **Αρχική στάθμη** ταμιευτήρα κατά την έναρξη του φαινομένου,  $z_0$

## □ Δεδομένα εξόδου:

- Πλημμυρογράφημα εκροής από τον υπερχειλιστή,  $Q(t)$
- Χρονική εξέλιξη στάθμης,  $z(t)$

## □ Εξίσωση υδατικού ισοζυγίου (**εξίσωση συνέχειας**):

$$dS/dt = I(t) - Q(t)$$

Οι υδρολογικές διεργασίες (αποθήκευση, εισροές, εκροές) εκφράζονται σε **συνεχή χρόνο**

## □ Η παραπάνω σχέση γράφεται ως **εξίσωση διαφορών** στο διάστημα $\Delta t = t_j - t_{j-1}$ , ήτοι:

$$S(z_j) - S(z_{j-1}) = \frac{1}{2} [I_j + I_{j-1} - Q(z_j) - Q(z_{j-1})] \Delta t$$

- Σε κάθε χρονικό βήμα  $j$ , είναι γνωστά τα μεγέθη  $S(z_{j-1})$ ,  $Q(z_{j-1})$ ,  $I_j$  και  $I_{j-1}$ , ενώ είναι άγνωστα τα μεγέθη  $S(z_j)$  και  $Q(z_j)$ , που είναι **μη γραμμικές εξισώσεις της στάθμης**  $z_j$ .
- Η εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου μπορεί να λυθεί είτε βήμα προς βήμα είτε ως σύστημα μη γραμμικών εξισώσεων, με αγνώστους όλες τις στάθμες  $z_j$ , και γνωστή αρχική συνθήκη τη στάθμη  $z_0$ . Η επίλυση μπορεί να γίνει και μέσω **βελτιστοποίησης**, με ζητούμενο την ελαχιστοποίηση του συνολικού σφάλματος των εξισώσεων υδατικού ισοζυγίου.

# Κατάρτιση σχέσης στάθμης-παροχή υπερχειλιστή

- Χαρακτηριστικά γεωμετρικά μεγέθη ελεύθερου υπερχειλιστή (ogee), με κατακόρυφη ανάντη παρειά:
  - Πλάτος υπερχειλιστή,  $L$
  - Ύψος υπερχειλιστή,  $P$
  - Παροχή σχεδιασμού,  $Q_d$
- Η **παροχή σχεδιασμού** εκτιμάται με βάση την πλημμύρα σχεδιασμού του υπερχειλιστή (επιλέγεται ως ποσοστό της παροχής αιχμής εισόδου ή προκύπτει από την απλοποιημένη επίλυση του μοντέλου διόδευσης).
- Η θεωρητική εξίσωση στάθμης-παροχής του ogee είναι:

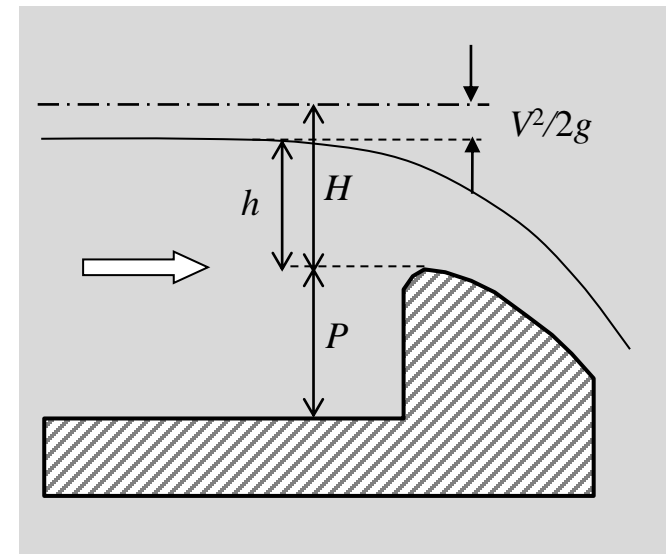
$$Q = c \sqrt{2g} L H^{3/2}$$

όπου  $H$  το υδραυλικό φορτίο και  $c$  συντελεστής, που εξαρτάται από τη γεωμετρία του ogee και την παροχή. Το υδραυλικό φορτίο δίνεται από τη σχέση:

$$H = h + \frac{V^2}{2g} = h + \frac{Q^2}{2g L^2 (P + h)^2}$$

όπου  $h$  το βάθος ροής και  $V$  η ταχύτητα στη διατομή εισόδου, ήτοι  $V = Q/[L(P + h)]$ .

- Συνδυάζοντας τις παραπάνω σχέσεις, για δεδομένη παροχή,  $Q$ , εκτιμώνται (μέσω δοκιμών) ο **συντελεστής παροχής**,  $c$ , και το **βάθος ροής**,  $h$ .



# Συντελεστής παροχής για το φορτίο σχεδιασμού

- Για το φορτίο σχεδιασμού,  $H_d$ , ο συντελεστής εκτιμάται από το εμπειρικό διάγραμμα, ως συνάρτηση του λόγου  $P/H_d$ . Το νομογράφημα προσεγγίζεται από την αναλυτική σχέση:

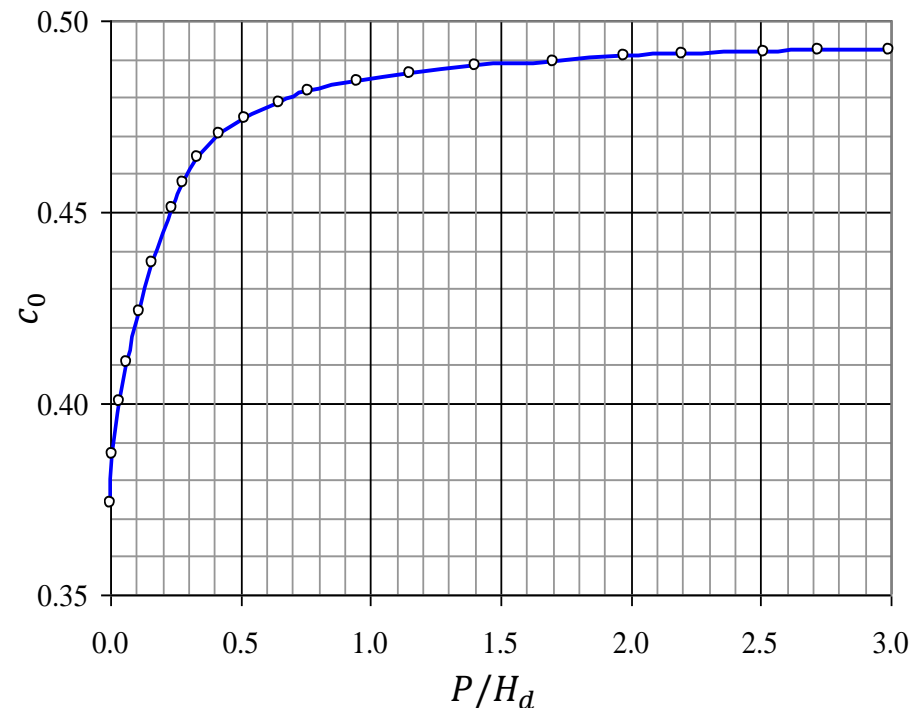
$$c_0 = 0.708 \left(\frac{P}{H_d}\right)^3 - 0.976 \left(\frac{P}{H_d}\right)^2 + 0.508 \left(\frac{P}{H_d}\right) + 0.376, \text{ για } P/H_d < 0.5$$

$$c_0 = 0.003 \left(\frac{P}{H_d}\right)^3 - 0.019 \left(\frac{P}{H_d}\right)^2 + 0.043 \left(\frac{P}{H_d}\right) + 0.458, \text{ για } 0.5 < P/H_d < 2.5$$

- Για μεγαλύτερες τιμές του λόγου  $P/H_d$ , ο συντελεστής  $c_0$  τείνει στην οριακή τιμή 0.492.

## Εκτίμηση φορτίου σχεδιασμού:

1. Υποθέτουμε ένα βάθος ροής,  $h$ .
2. Υπολογίζουμε την ταχύτητα  $V$  και το αντίστοιχο φορτίο,  $H$ .
3. Υπολογίζουμε την τιμή του συντελεστή  $c_d$  από το νομογράφημα ή αναλυτικά
4. Υπολογίζουμε την παροχή  $Q$ , θέτοντας  $c = c_0$ . Αν η τιμή της είναι μικρότερη της παροχής σχεδιασμού  $Q_d$ , αυξάνουμε το βάθος ροής  $h$ , ενώ αν είναι μεγαλύτερη το μειώνουμε.

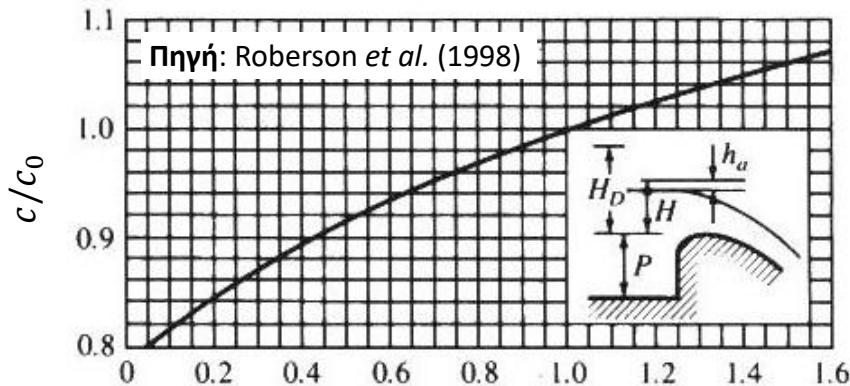


# Συντελεστής παροχής για συνθήκες εκτός σχεδιασμού

- Για τιμές παροχής διαφορετικές από τις συνθήκες σχεδιασμού, το ύψος ενέργειας πάνω από τη στέψη του υπερχειλιστή είναι διαφορετικό από το φορτίο σχεδιασμού,  $H_d$ , και ο συντελεστής παροχής μεταβάλλεται.
- Αν η παροχή υπερβαίνει την παροχή σχεδιασμού, ήτοι  $Q > Q_d$ , γίνεται αποκόλληση της ροής λόγω υποπίεσης στην περιοχή της στέψης, και επομένως  $c > c_0$ , ενώ αν  $Q < Q_d$  έχουμε υπερπίεση στην περιοχή της στέψης και αντίστοιχη μείωση του συντελεστή.
- Η μεταβολή του συντελεστή παροχής, συναρτήσει των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του οgee, δίνονται από νομογραφήματα. Για **κατακόρυφο οgee**, το σχετικό νομογράφημα προσεγγίζεται από την αναλυτική σχέση:

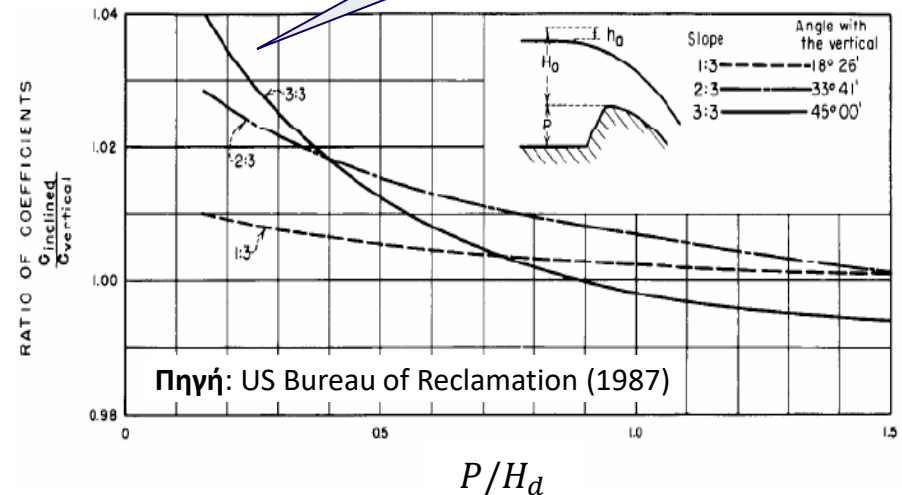
$$\left(\frac{c}{c_0}\right) = 0.03 \left(\frac{H}{H_d}\right)^3 - 0.14 \left(\frac{H}{H_d}\right)^2 + 0.32 \left(\frac{H}{H_d}\right) + 0.79$$

Διόρθωση συντελεστή παροχής για κεκλιμένη ανάτη παρειά



Συντελεστής παροχής για κατακόρυφη παρειά

$H/H_d$



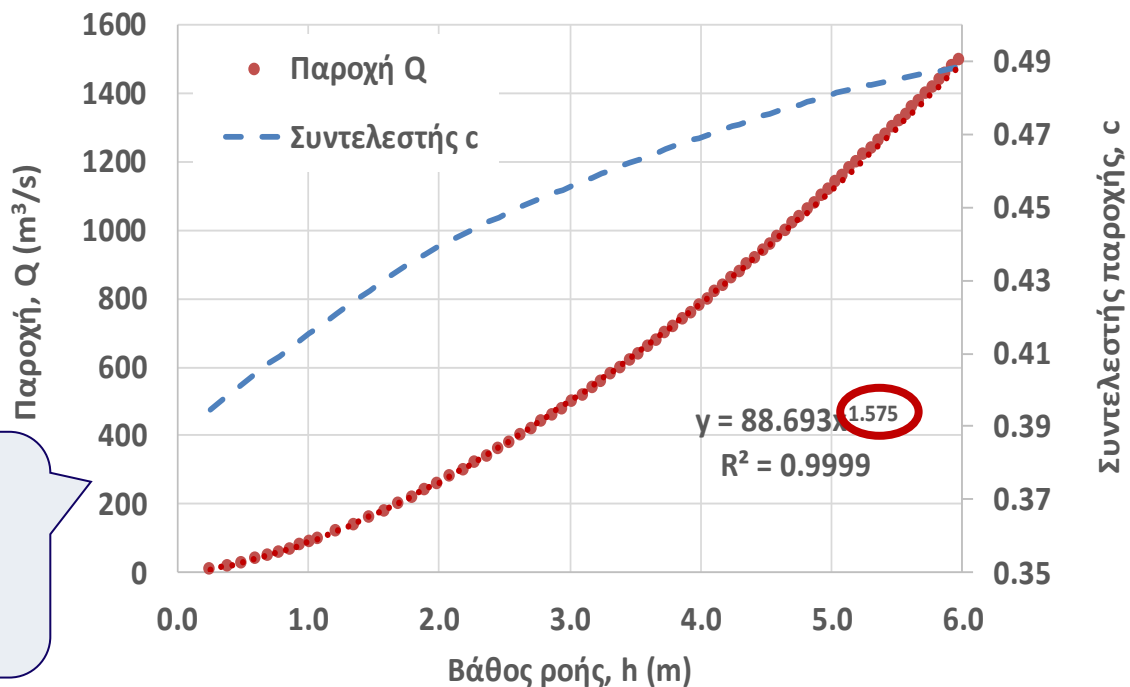
$P/H_d$



# Κατάρτιση σχέσης στάθμης-παροχής υπερχειλιστή

Για δεδομένη παροχή,  $Q$ , και δεδομένο φορτίο σχεδιασμού,  $H_d$ :

1. Υποθέτουμε ένα βάθος ροής,  $h = z - z_w$  ( $z_w$ : υψόμετρο στέψης οgee).
2. Υπολογίζουμε την ταχύτητα  $V$  και το αντίστοιχο φορτίο,  $H$ .
3. Υπολογίζουμε την αρχική τιμή του συντελεστή παροχής  $c_0$  από το νομογράφημα ή αναλυτικά, συναρτήσει του λόγου  $\frac{P}{H_d}$
4. Διορθώνουμε την αρχική τιμή συντελεστή παροχής  $c_0$  από το νομογράφημα ή αναλυτικά, συναρτήσει των λόγων  $\frac{H}{H_d}$  και  $\frac{P}{H_d}$  (για κεκλιμένο οgee).
5. Υπολογίζουμε την παροχή  $Q$ , εφαρμόζοντας την ανηγμένη τιμή του συντελεστή παροχής. Αν η τιμή είναι μικρότερη της ζητούμενης, αυξάνουμε το βάθος ροής  $h$ , ενώ αν είναι μεγαλύτερη το μειώνουμε.



Παράδειγμα κατάρτισης σχέσεων βάθους ροής – παροχής και συντελεστή παροχής σε οgee με  $L = 40$  m,  $P = 3$  m και  $Q_d = 1000$  m<sup>3</sup>/s.

# Εκτίμηση ενεργού πλάτους υπερχειλιστή

- Το ενεργό πλάτος υπερχειλιστή με μεσόβαθρα δίνεται από τη σχέση:

$$L = L' - 2(N k_p + k_a) H_d$$

όπου  $L'$  το ολικό πλάτος,  $N$  το πλήθος των μεσοβάθρων,  $H_d$  το φορτίο σχεδιασμού,  $k_p$  συντελεστής συστολής στις θέσεις των βάθρων, και  $k_a$  συντελεστής συστολής στο πέρασ του υπερχειλιστή (ακρόβαθρο ή αντέρεισμα).

$k_p$  is pier contraction coefficient (for design head,  $H_o$ , average values include: 0.2 for square-nosed piers with rounded corners; 0.1 for rounded-nosed piers; and 0.0 for pointed-nosed piers). For more details, refer to Chapter 5, “Hydraulic Considerations for Spillways and Outlet Works,” in this design standard.

$k_a$  is abutment (end wall) contraction coefficient (for design head,  $H_o$ , average values include: 0.2 for square abutments with walls 90 degrees to flow direction; 0.1 for rounded abutments ( $0.5H_o \leq r \leq 0.15H_o$ ) with walls 90 degrees to flow direction; and 0.0 for rounded abutments ( $r > 0.5H_o$ ) and walls  $\leq 45$  degrees to flow direction). For more details, refer to Chapter 5, “Hydraulic Considerations for Spillways and Outlet Works,” in this design standard.

Απόσπασμα από τις προδιαγραφές του U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, 2014 (Chapter 3: General Spillway Design Considerations)

Οι προτεινόμενες τιμές των συντελεστών συστολής εφαρμόζονται για μονάδες μήκους σε ft (1 ft = 0.3048 m)

# Πρακτικά θέματα σχεδιασμού υπερχειλιστών

## □ Τυπικές παραδοχές:

- Στον προκαταρκτικές αναλύσεις, για απλούστευση εισάγεται μια τυπική τιμή του όρου  $c \sqrt{2g}$  (από 1.7 έως 2.3, ανάλογα με την κατάσταση του συστήματος υπερχειλίσης) και αγνοείται ο όρος της κινητικής ενέργειας.
- Κατά την έναρξη της πλημμύρας θεωρείται ότι ο ταμιευτήρας βρίσκεται στην ανώτατη στάθμη λειτουργίας του, δηλαδή  $z_0 = z_c$  (συντηρητική παραδοχή)
- Τα έργα υδροληψίας με εκροή στην κοίτη του ποταμού (π.χ. στρόβιλοι) λειτουργούν με στην πλήρη παροχετευτικότητά τους,  $Q_{max}$ , ενώ τα έργα με εκροή εκτός της κοίτης (π.χ., υδρευτικές ή αρδευτικές υδροληψίες) λειτουργούν με τη συνήθη παροχή τους (κατά κανόνα, είναι πολύ μικρή συγκριτικά με τα πλημμυρικά μεγέθη).
- Εφόσον υπάρχουν θυροφράγματα, αυτά θεωρούνται ανοιχτά καθ' όλη τη διάρκεια εξέλιξης του πλημμυρικού φαινομένου (εξαίρεση: ανατρεπόμενα θυροφράγματα).

## □ Παρατηρήσεις:

- Εφόσον λειτουργούν τα έργα υδροληψίας με την πλήρη παροχετευτικότητά τους, από αυτά διέρχεται σταθερή παροχή  $Q_{max}$ , μέχρι η εισροή ανάντη να προκαλέσει ανύψωση της στάθμης πάνω από τη στέψη του υπερχειλιστή, οπότε για  $z \leq z_c$  δεν πραγματοποιείται υπερχειλίση, ενώ για  $z > z_c$  διέρχεται παροχή  $Q_{max}$  από τις υδροληψίες και παροχή  $Q - Q_{max}$  από τον υπερχειλιστή.
- Σε μελέτες επιχειρησιακής διαχείρισης πλημμυρών λαμβάνεται υπόψη η ρύθμιση των εκροών από τις υδροληψίες και τα λοιπά έργα ελέγχου (π.χ. θυροφράγματα).

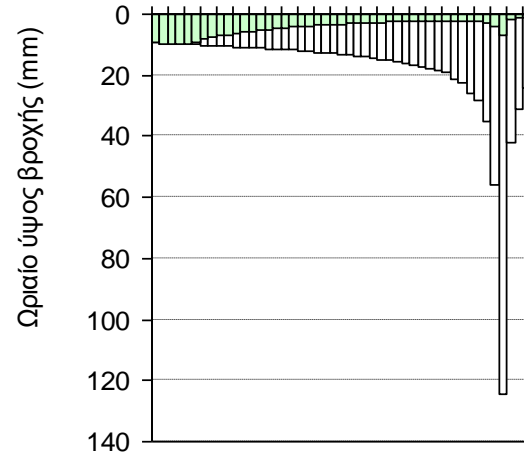
# Παράδειγμα: Ταμιευτήρας Αποσελέμη

## Παραδοχές μελέτης

- Περίοδος επαναφοράς 60 000 έτη (πιθανή μέγιστη κατακρήμνιση)
- Βροχόπτωση διάρκειας 24 h
- Υετογράφημα δυσμενέστερης διάταξης
- Εκτίμηση ελλειμμάτων με τη μέθοδο SCS-CN, με  $CN = 55$  και  $\alpha = 20\%$
- ΣΜΥ Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας
- Βασική απορροή  $81 \text{ m}^3/\text{s}$  (εισορή πηγών Κασταμονίτσας, εκτροπή από Οροπέδιο Λασιθίου, τήξη χιονιού)
- Υπερχειλιστής με  $b = 40 \text{ m}$ ,  $c = 2.2$

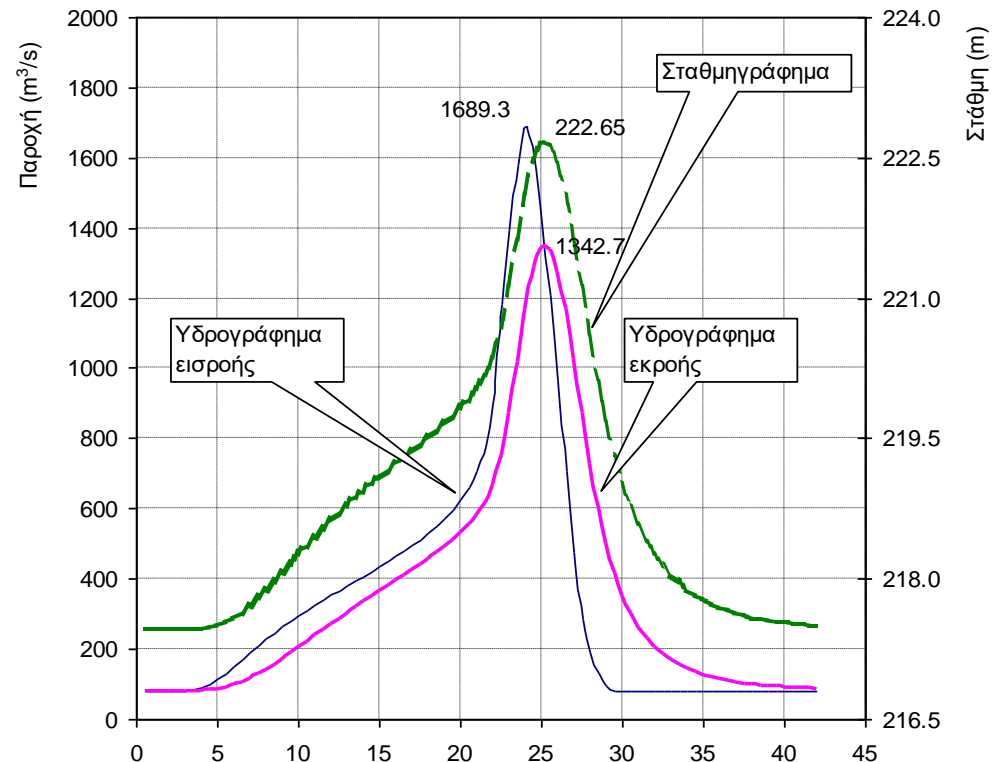
## Βασικά μεγέθη σχεδιασμού

- Συνολικό ύψος βροχής 902 mm
- Ενεργό ύψος βροχής 693 mm
- Όγκος πλημμύρας  $42.0 \text{ hm}^3$
- Συνολικός όγκος εισροής  $50.5 \text{ hm}^3$
- Παροχή αιχμής εισόδου  $1689 \text{ m}^3/\text{s}$
- Παροχή αιχμής εξόδου  $1342 \text{ m}^3/\text{s}$
- Μέγιστη στάθμη πλημμύρας  $+222.65 \text{ m}$
- Στέψη υπερχειλιστή  $+216.50 \text{ m}$



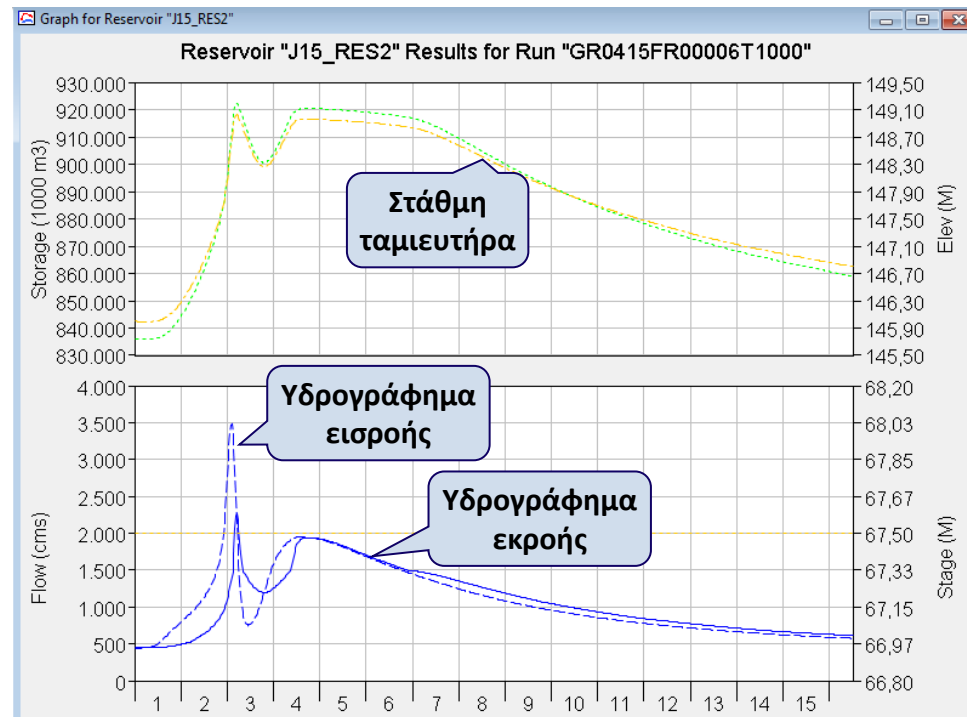
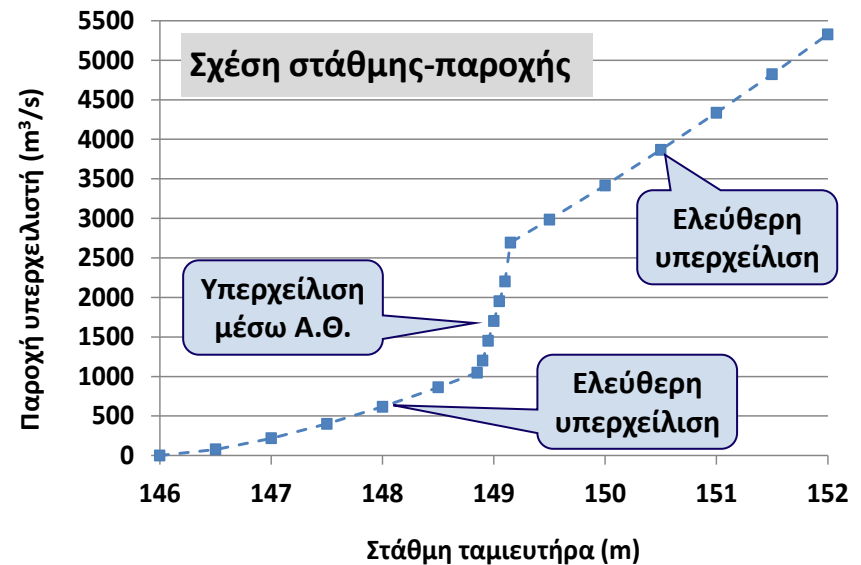
Υετογράφημα και υδρογράφημα εισροής και εκροής σχεδιασμού του υπερχειλιστή και σταθμηγράφημα του ταμιευτήρα Αποσελέμη

Πηγή: Κουτσογιάννης κ.ά., 2001



# Παράδειγμα: Ταμιευτήρας Καστρακίου (ανατρεπόμενα θυροφράγματα)

- Στέψη υπερχειλιστή +144.6 m, πλάτος 120 m, ύψη ανατρεπόμενων θυροφραγμάτων από 1.80 έως 1.93 m.
- Μεταξύ των +146.0 έως +148.85 m πραγματοποιείται **ελεύθερη υπερχειλίση**, με σχέση στάθμης-παροχής είναι  $q = c b (z - z_0)^{3/2}$ , όπου  $c = 1.816$  και  $z_0 = +146.0$  m.
- Από τα +148.85 έως τα +149.15 m πραγματοποιείται **διαδοχική ανατροπή των 20 θυροφραγμάτων** για κάθε 5 cm αύξησης της στάθμης.
- Άνω των +149.15 m τα θυροφράγματα έχουν ανατραπεί, η **υπερχειλίση είναι ελεύθερη** (από την αρχική, πλέον, στέψη του υπερχειλιστή), και η σχέση στάθμης-παροχής γίνεται  $q = c b (z - z_0)^{3/2}$ , όπου  $c = 2.038$  και  $z_0 = +144.2$  m.



Πηγή: Καραβοκύρης & Συν/τες, 2015

Προσομοίωση για  $T = 1000$  έτη

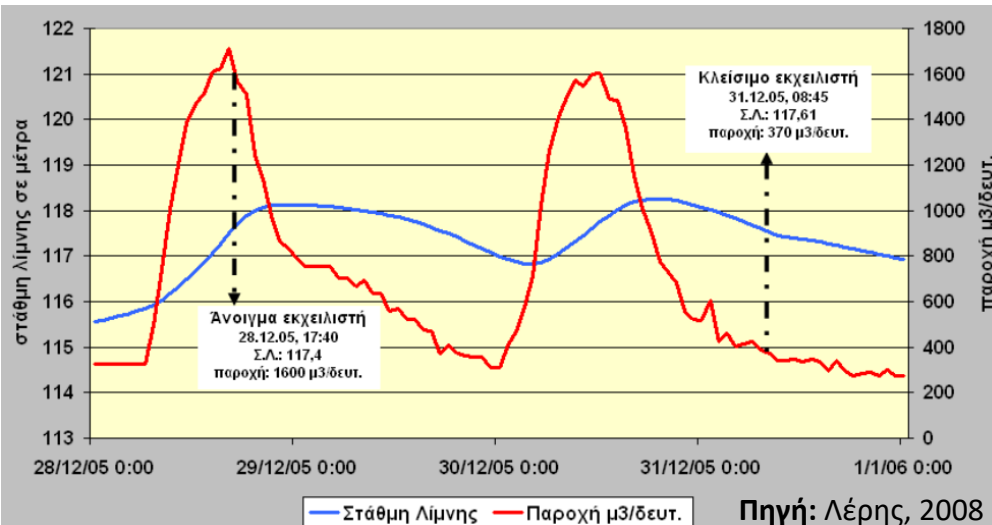
# Παράδειγμα: Διαχείριση θυροφραγμάτων και στροβίλων φράγματος Πουρναρίου σε πλημμύρα

## Χαρακτηριστικά μεγέθη

- ❑ Χωμάτινο φράγμα, ύψους 87 μ (στέψη +127.0 m)
- ❑ Στέψη εκχειλιστή +107.5 m
- ❑ Τρία τοξωτά θυροφράγματα 12.5×12.5 m (στέψη +120.0 m)
- ❑ Παροχетеυτικότητα στροβίλων 500 m<sup>3</sup>/s
- ❑ Παροχή αιχμής υπερχειλιστή 6100 m<sup>3</sup>/s (ΑΣΠ +125.5 m)

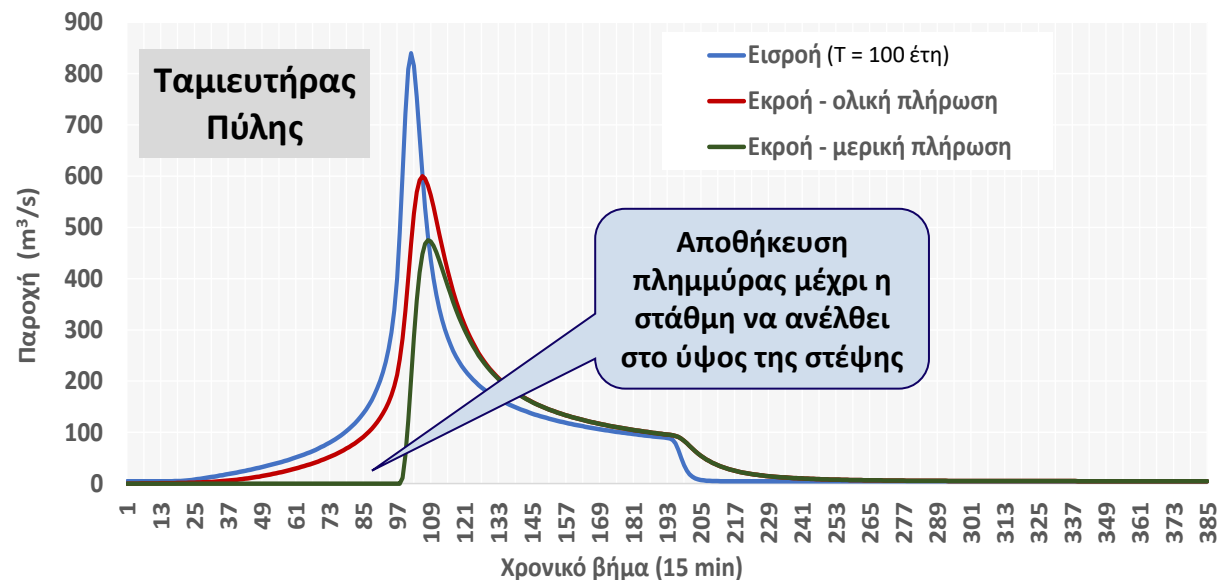
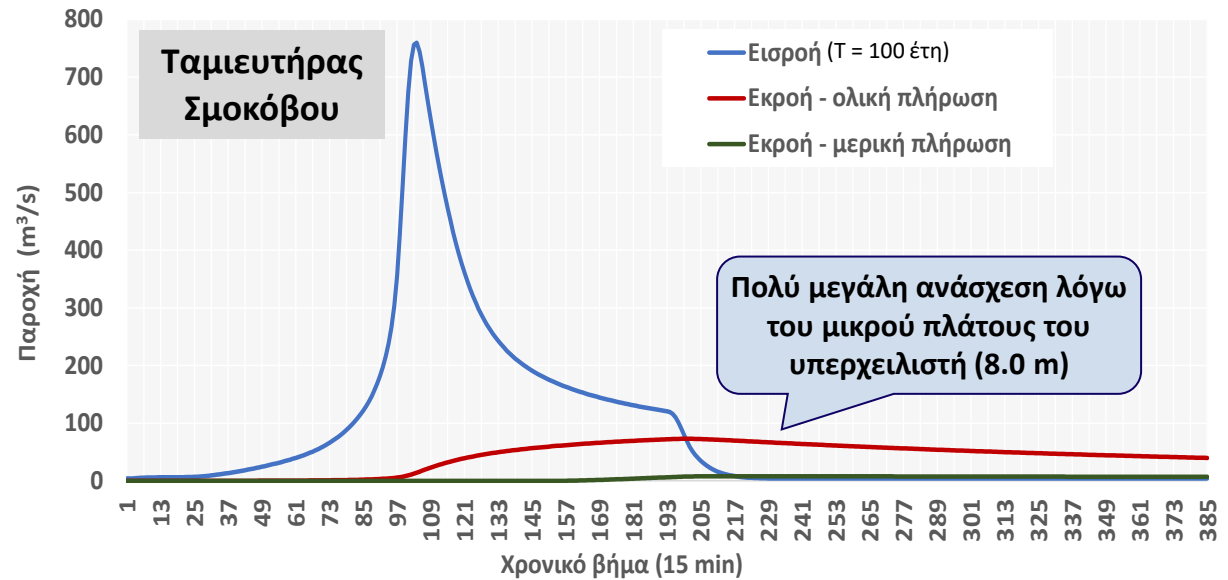
## Κριτήρια ελέγχου έργων διαχείρισης πλημμυρών

- ❑ Ασφάλεια φράγματος - προστασία κατάντη περιοχών
- ❑ Απώλειες υδροδυναμικού λόγω υπερχειλίσσης
- ❑ Λειτουργία σταθμού παραγωγής σύμφωνα με τον προκαθορισμένο ενεργειακό προγραμματισμό



# Ο αντιπλημμυρικός ρόλος των ταμιευτήρων

- Η αναπαράσταση της διόδευσης είναι αναγκαία και στο πλαίσιο άλλων μελετών (π.χ., **μελέτες διαχείρισης πλημμυρικού κινδύνου**), στις οποίες εξετάζονται σενάρια λειτουργίας ταμιευτήρων για γεγονότα πέραν της πλημμύρας σχεδιασμού.
- Στις μελέτες αυτές μπορεί να θεωρηθεί ότι ο ταμιευτήρας βρίσκεται σε **μερική πλήρωση** (η προσομοίωση ξεκινά με στάθμη χαμηλότερη από τη στέψη του ogee), επιτυγχάνοντας έτσι όχι μόνο ανάσχεση της πλημμύρας αλλά και μερική αποθήκευσή της.



# Αναφορές

---

- Καραβοκύρης & Συν/τες, *Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών των Υδατικών Διαμερισμάτων Δυτικής Στερεάς Ελλάδας, Ηπείρου και Θεσσαλίας (GR04, GR05, GR08)*, Ειδική Γραμματεία Υδάτων, ΥΠΕΚΑ, 2015.
- Κουτσογιάννης, Δ., Ι. Ναλμπάντης, Ν. Μαμάσης, Α. Ευστρατιάδης, Λ. Λαζαρίδης, και Α. Δανιήλ, Υδρολογική μελέτη πλημμυρών, *Τεχνικός Σύμβουλος για το έργο "Υδρευση Ηρακλείου και Αγίου Νικολάου από το φράγμα Αποσελέμη"*, Εργοδότης: ΥΠΕΧΩΔΕ, Ανάδοχος: Κ/Ξ Αποσελέμη, Αθήνα, 2001.
- Κουτσογιάννης, Δ., *Σχεδιασμός Αστικών Δικτύων Αποχέτευσης*, Έκδοση 4, 180 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2011.
- Λέρης, Γ. Ε., Αντιμετώπιση πλημμυρών στα φράγματα της ΔΕΗ Α.Ε. στους ποταμούς Αχελώο, Άραχθο και Νέστο, *1ο Πανελλήνιο Συνέδριο Μεγάλων Φραγμάτων με Διεθνή Συμμετοχή και Έκθεση Υλικών*, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Λάρισα, 2008.
- Παπανικολάου, Π. *Στοιχεία μόνιμης ροής σε αγωγούς υπό πίεση & αγωγούς με ελεύθερη επιφάνεια*, Διδακτικές σημειώσεις, Έκδοση 2, 264 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2012.
- Roberson, J. A., J. J. Cassidy, and M. H. Chaudhry , *Hydraulic Engineering*, 2<sup>nd</sup> edition, John Wiley and Sons, New York., 1998